

УДК 550.36

А. Назаревич, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
А. Микита, пров. інж.

ГЕОТЕРМІЧНИЙ МЕТОД У СЕЙСМОПРОГНОСТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ У ЗАКАРПАТТІ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Представлено перспективи застосування геотермічного методу в сейсмопрогностичних дослідженнях у Закарпатті. Коротко розглянуто фізику флюїдно-гідротермальних процесів як фізичну основу методу, методико-апаратне забезпечення та деякі результати свердловинних геотермічних досліджень.

The futures of application of geothermal method in seismoprostic researches in Transcarpathians are represented. The physics of fluid-hydrothermal processes as the physical basis of the method and also methodical-apparatus supply and some results of borehole geothermal researches are briefly considered.

Вступ. Геотермічний метод є одним з тих, які використовуються у сейсмопрогностичних дослідженнях, у тому числі і в Закарпатті. Раніше такі дослідження тут проводились під керівництвом Р.І. Кутаса на режимній геофізичній станції "Тросник" у ізольованій обсадними трубами свердловині на глибині 500 м за допомогою спеціальної геотермічної апаратури – електротермометра опору з мідним датчиком [7]. Спостереження тривали впродовж 9 років (1989-1998 рр.). За перші 6,5 років зареєстровано сумарне зниження температури на $0,21^{\circ}\text{C}$, за наступні 2,5 роки – деяке її підвищення (на $\sim 0,05^{\circ}\text{C}$). На фоні тренду зафіксовано короткотривалі (тривалістю від кількох днів до кількох тижнів) флуктуації температури з амплітудами до $0,03-0,1^{\circ}\text{C}$. Подібні дослідження проводились працівниками Закарпатської геологічної експедиції на свердловинах у м. Берегове та с. Іванівка (Яноші) на глибинах 80 і 200 м електротермометрами з мідним та термісторним датчиками (дані знімалися 1-3 рази на тиждень [7]). За 10 років (1986-1995 рр.) тут зафіксовано зниження температури на $0,52$ і $0,44^{\circ}\text{C}$ відповідно. Короткоперіодні варіації (зважаючи на режим реєстрації даних) не простежені. Зараз геотермічні дослідження ведуться нами на пунктах спостережень Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України в Закарпатті – на РГС "Берегове" і геотермічному пункті "Косино" [11, 12] (рис. 1).

Постановка задачі. Для подальшого розвитку геотермічних досліджень у Закарпатті необхідно було проаналізувати фізику різних геотермічних процесів, можливості методу та апаратури і запропонувати та реалі-

зувати такі методико-апаратні модифікації геотермічних досліджень, які б забезпечили ефективність методу в сейсмопрогностичному моніторинзі.

Фізика геотермічних процесів. У верхніх шарах земної кори можливий перенос тепла процесами двох типів – кондуктивний (за рахунок теплопровідності порід) і конвективний (за рахунок вулканічних процесів та циркуляції флюїдів) [3, 7-9].

Кондуктивний перенос є дуже інерційним процесом, зважаючи на низьку теплопровідність гірських порід [3, 8, 9], тому він є малоперспективним з точки зору сейсмопрогностичних досліджень.

Вулканічні процеси у Закарпатті відбувались у неогені (11–7 млн років тому) і зараз тут спостерігаються тільки їх залишкові явища, зокрема, підвищені значення глибинного теплового потоку [3, 8, 9]. Найбільш перспективним для Закарпаття є використання флюїдно-гідротермальних процесів, які завдяки циркуляції глибинних гідротермальних флюїдів у тріщинуватих породах є чутливими до змін напружено-деформованого стану масивів порід [5, 15, 16]. Перспективи використання таких процесів розглянемо на реальних даних гідротермальних свердловин Закарпаття (рис. 2).

Оцінки гідротермальних ефектів для свердловин Закарпаття. Як бачимо з рис. 2, а, конструкція гідротермальних свердловин відрізняється тим, що в зонах наявності гідротермальних флюїдів проведено перфорацію обсадних труб, і таким чином забезпечено зв'язок рідини у свердловині з рідиною у затрубному просторі.



Рис. 1. Розташування пунктів режимних геофізичних спостережень КВ ІГФ НАНУ в центральній частині Закарпаття (на картооснові Google)

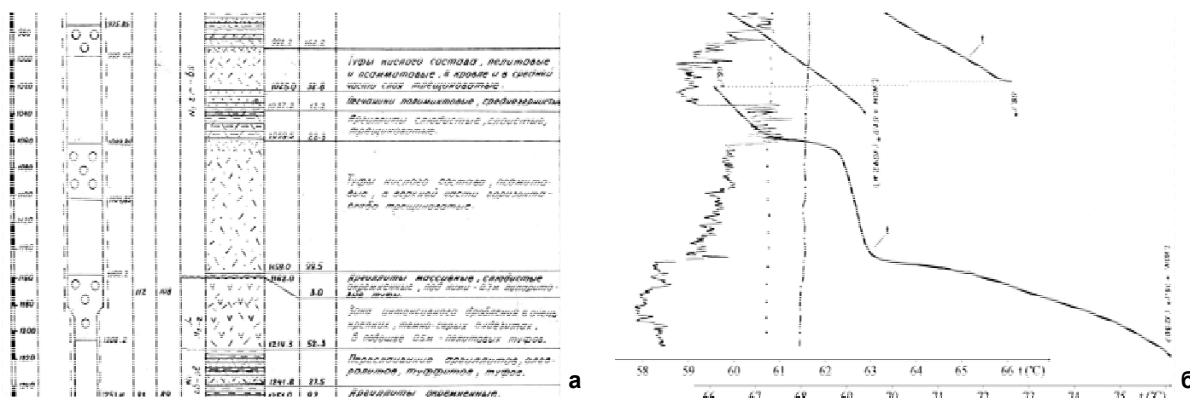


Рис. 2. Геолого-геофізичні дані по одній з гідротермальних свердловин Закарпаття (фрагмент): а – конструкція свердловини і характеристики порід по розрізу; б – температурний профіль свердловини (всі дані – Закарпатської геологорозвідувальної експедиції)

Внаслідок цього на температурному профілі свердловини (рис. 2, б) чітко відображаються зони високих геотермічних градієнтів, які співпадають з верхніми границями зон перфорації, що попали на глибинні флюїдно-гідротермальні зони (середня і нижня зони). Так, вище від середньої зони перфорації температурний градієнт (середній по свердловині) становить близько $0,05^{\circ}\text{C}/\text{м}$. А в районі верхнього краю середньої та нижньої зон перфорації цей градієнт є набагато вищим і складає уже до $0,3\text{--}0,5^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

Тепер оцінимо ці дані з точки зору змін напружено-деформованого стану масивів порід і можливостей контролю процесів підготовки відчутних місцевих землетрусів. Так, відомо, що скинуті напруження у вогнищах землетрусів (не беручи до уваги крайні значення для кріпексних та "зривних" подій) здебільшого мають величини від 3 до 40 бар. Для наших оцінок приймемо середню величину – 10 бар. Тепер скористаємося даними І. Добровольського [4] про характер загасання напружень і деформацій при віддаленні від вогнищевої зони. Так, за цими даними на відстанях, рівних 10-ти радіусам вогнищевої зони, напруження і деформації знижуються приблизно у 100 разів. Скориставшись даними наших досліджень величин розривів у вогнищах місцевих закарпатських землетрусів [13], можемо оцінити

довжину розриву відчутного (з $K=8,5$, $M=2,5$) місцевого землетрусу приблизно в 1 км, розмір його вогнищевої зони – у 3 км, а еквівалентний радіус – у 1,5 км.

Отже, за цими даними на відстанях 15-20 км від вогнища при підготовці відчутного місцевого землетрусу можуть очікуватися величини змін напружень у 0,1 бар. Враховуючи, що 1 бар (1 атм.) – це 10 м водяного стовпа, 0,1 бар – це зміщення (підняття чи опускання, залежно, відповідно, від режиму стиску чи розтягу) стовпа рідини у свердловині на 1 м, а отже, зміни контрольованої температури на фіксованій глибині від $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ (при розміщенні геотермічного зонда в зоні звичайних градієнтів) до $\pm 0,3\text{--}0,5^{\circ}\text{C}$ (при розміщенні зонда у високоградієнтній зоні). Для більших епіцентральної відстаней (наприклад, у 20 радіусів вогнища, або у 30-40 км) коефіцієнт загасання напружень становить порядку 1000, а величини температурних ефектів у свердловинах – від $\pm 0,005^{\circ}\text{C}$ до $\pm 0,03\text{--}0,05^{\circ}\text{C}$. Наведені оцінки можна вважати ближчими до мінімальних, оскільки за реальними даними польових досліджень на сейсмопрогностичних полігонах загасання деформацій при віддаленні від вогнищевих зон може бути значно меншим, ніж за теоретичними побудовами І. Добровольського, отже, реально ефекти та зони їх прояву можуть бути у рази більшими.

Апаратурне забезпечення геотермічних досліджень. Розглянемо апаратурні можливості щодо реєстрації оцінених вище флюїдно-гідротермальних температурних ефектів. Як бачимо з наведених оцінок, величини температурних ефектів у свердловинах можуть становити від 0,005 до 0,5 0C. Для їх надійної фіксації та простеження ходу змін чутливість апаратури має бути ще у 5-10 разів вищою, тобто порядку 0,001 0C.

Якщо контроль змін температур у свердловині на рівні 0,1 0C забезпечити порівняно просто, то на рівні 0,001 0C це вже досить складне завдання. Відразу відзначимо, що з використанням різних аналогових термосенсорів і з вимірюванням їх сигналу на поверхні біля устя свердловини такої (порядку 0,001 0C) точності вимірювань забезпечити важко через вплив довгих (сотні метрів) кабелів (та відповідних електричних, електро-

температурних та інших завад) між сенсором та вимірювальним приладом. Тому вимірювання необхідно реалізувати на місці – у свердловинному зонді, а на поверхню передавати вже результат вимірювань, на який не будуть впливати різні завади.

Варіантом реалізації такої схеми вимірювань є використання кварцових термочастотних датчиків [10] і створення з їх використанням вбудованих у зонд вимірювальних генераторів [1, 6]. Такий спосіб вимірювань вже довгий час використовується, в тому числі і нами, при дослідженнях геотермічних ефектів [2, 11, 12, 14, 16], він показав свою ефективність. Його і використано нами для створення спеціального свердловинного геотермічного зонда і відповідного апаратурного комплексу [11, 12]. Схему такої апаратури наведено на рис. 3, а, а сам свердловинний зонд показано на рис. 3 б.

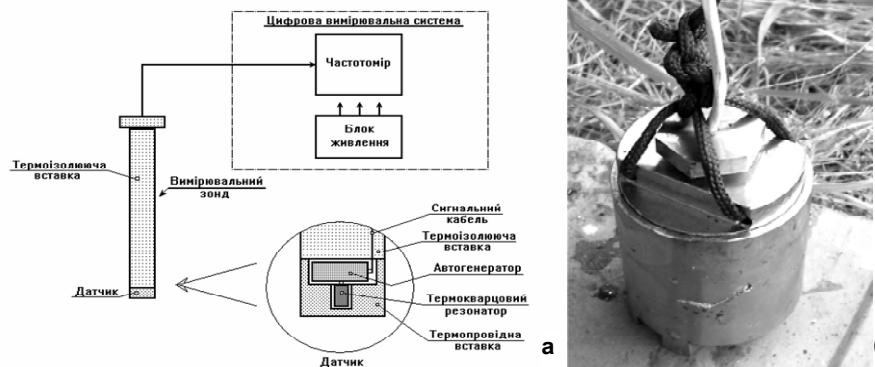


Рис. 3. Структурно-функціональна блок-схема вимірювальної системи для геотермічного моніторингу з кварцовим термочастотним датчиком (а) та її свердловинний зонд (б)

Метрологічні характеристики комплексу визначаються в першу чергу характеристиками використовуваного частотоміра. Оскільки в експериментальному варіанті апаратури нами використано частотомір-хронометр Ф5041, який забезпечує вимірювання частот з точністю 10-7 і з розділенням по частоті 0,1 Гц, а температурний коефіцієнт кварцових датчиків – близько 185 Гц/0C, то приведена апаратурна точність вимірювань температури (по частоті) становить не гірше 0,0027 0C (враховуючи, що робоча частота датчика – 5 МГц), а роздільна здатність ~0,0005 0C.

Додатково нами спеціально досліджено довготривалі (впродовж кількох діб) дрейфи показів даної апаратури та вплив на них змін температури повітря в місці встановлення частотоміра. Для порівняльних досліджень використано також частотомір ЧЗ-35А. Вивчено порівняльні особливості процесу встановлення метрологічних параметрів даних приладів (рис. 4, а), спричинені виходом на

робочий режим термостатів генераторів опорної частоти, та вплив цих процесів на точність результатів вимірювань температури порід. Досліджено паразитний вплив ходу встановлення температурного режиму вимірювального генератора на зміни частоти вимірювального термочастотного кварцового датчика. За результатами цих досліджень розроблено модифіковану конструкцію вимірювального зонда з рознесеними та взаємно температурно ізованими термочастотним кварцовим датчиком і схемою генератора. Досліджено результуючі метрологічні характеристики геотермічного апаратурного комплексу. Встановлено (див. рис. 4, б), що пов'язані з апаратурними факторами похибки для такої модифікованої апаратури навіть у циклічному режимі роботи (з періодичними увімкненнями-вимкненнями) після 40 хв прогріву не перевищують $\pm 0,001$ 0C, що задовольняє проаналізованим вище вимогам до проведення сейсмопрогностичного геотермічного моніторингу.

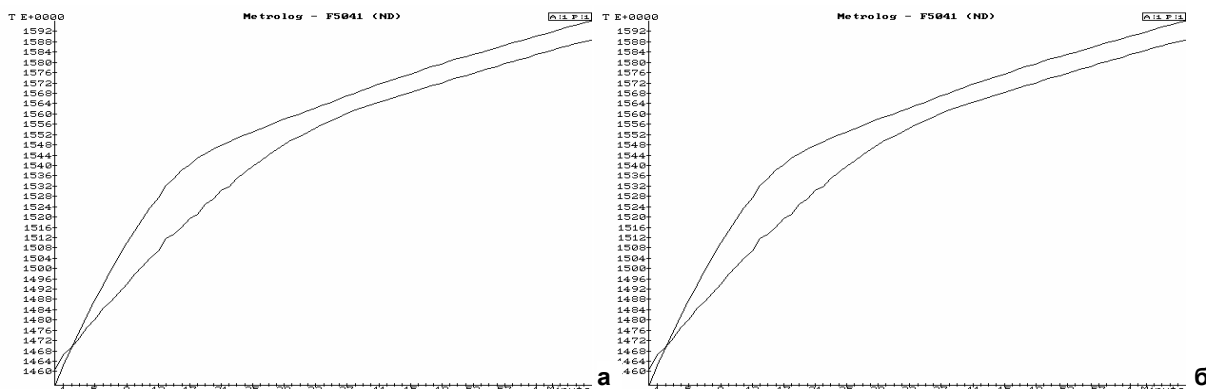


Рис. 4. Порівняльні особливості режиму встановлення метрологічних параметрів частотоміра-хронометра Ф5041 та частотоміра ЧЗ-35А (а) (шкала температур у сотнях долях 0C) та режиму встановлення метрологічних параметрів модифікованого зонда з винесеним датчиком (шкала температур у десятитисячних долях 0C)

Результати польових досліджень. Польові геотермічні дослідження за допомогою описаної апаратури з термочастотними кварцовими датчиками ведуться нами в Закарпатті на РГС "Берегове" і геотермічному пункті "Косино". На рис. 5 наведено деякі результати цих досліджень. Завданням досліджень на РГС "Берегове" (рис. 5 а) є у першу чергу контроль змін температур метеорологічного походження у масиві порід штольні РГС для наступної редукції відповідних терморужних деформацій з деформографічних даних. Результати цих досліджень вже в основному описані в роботах [11, 12]. Тут тільки відзначимо, що наявні на рис. 5 а на фоні сезонної складової численні короткі піки від'ємної полярності в основному являються і пов'язані з недостатнім врахуванням у минулому показань на рис. 4 режимів встановлення метрологічних параметрів вимірювальної апаратури та з іншими апаратними факторами.

На геотермічному пункті "Косино" дослідження розпочато у не використовуваній зараз спеціальній геотермічній свердловині. Зонд (показаний на рис. 3 б) опу-

щено на глибину 50 м. Отримані тут за листопад-грудень 2010 р. перші результати наведено на рис. 5 б у порівнянні з температурою повітря. Вони свідчать про достатню надійність конструкції зонда щодо витриманого нею тиску води та про достатню чутливість і стабільність метрологічних характеристик апаратури. Зокрема, кореляції з варіаціями температури повітря, яка змінювалась за даний період з +13 до -4 °С, не простежується, що свідчить про надійну роботу модифікованої вимірювальної системи, її реальна стабільність не гірша, ніж отримані під час заводських метрологічних випробувань паспортні значення для використаного частотоміра (0,00270°С у перерахунку на зміни температури). Щодо особливостей проявів у геотермічних даних процесів підготовки місцевих закарпатських землетрусів конкретні висновки можна буде зробити після отримання довших часових рядів, які будуть включати періоди, коли в радіусі 20-30 км від пункту спостережень відбудеться відчутний (з магнітудою не менше 2,0-2,4) землетрус.

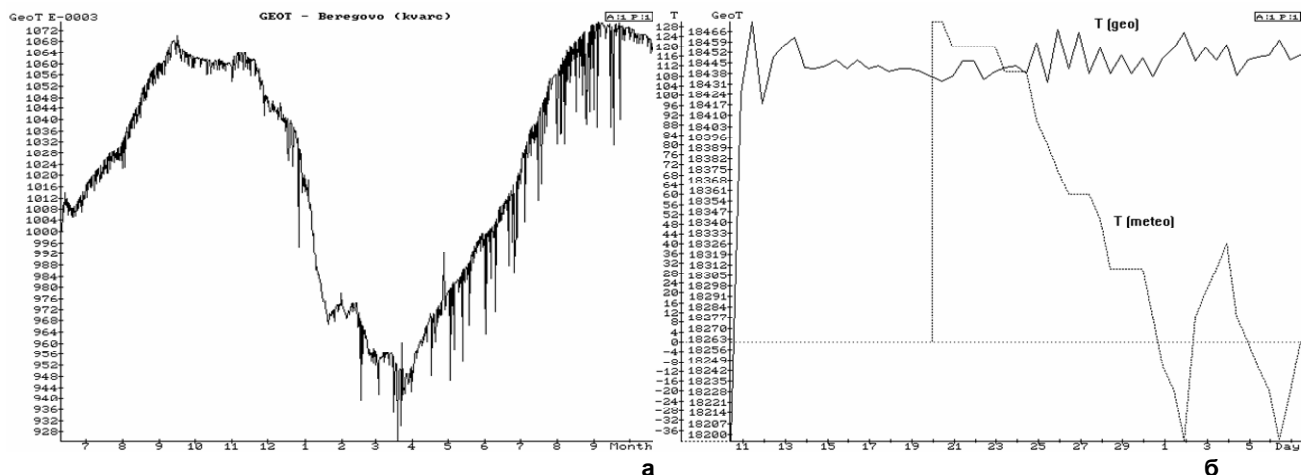


Рис. 5. Зміни температури масиву порід штольні РГС "Берегове" (а) (шкала в сотих долях °С) за даними системою з кварцовим температурним датчиком за період з 10.06.2008 р. до 20.10.2009 р. та зміни температури у геотермічній свердловині на пункті "Косино" (б) за листопад-грудень 2010 р. у порівнянні зі змінами температури повітря (шкали в тисячних та десятих долях °С відповідно)

Висновки. Виходячи з викладеного, можна зробити висновок, що запропонована методика сейсмопрогностичних геотермічних досліджень у Закарпатті з використанням гідротермальних свердловин та представленої геотермічної апаратури з кварцовими термочастотними датчиками здатна забезпечити виявлення процесів підготовки відчутних місцевих землетрусів у радіусі кількох десятків кілометрів від пункту спостережень. Розширення мережі пунктів та подальше вдосконалення апаратури, в першу чергу щодо довготривалої стабільності її метрологічних характеристик, дозволить забезпечити проведення сейсмопрогностичного моніторингу на всій території сейсмоактивного Закарпатського прогину з можливістю оцінок величин змін напружено-деформованого стану масивів порід у пунктах спостережень.

1. Альтшуллер Г.Б., Елфимов Н.Н., Шакулин В.Г. Кварцевые генераторы: справочное пособие. – М., 1984. 2. Аннюк Ф.М., Осадчий В.Г., Филлюс Р.И., Чекалюк Э.Б. Геотермическая станция ГС-1 // Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР. – К., 1981. – С. 79-80. 3. Гогель Ж. Геотермия. – М., 1978. 4. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М., 1991. 5. Ковалишин З.И., Братусь М.Д. Флюидный режим

гидротермальных процессов Закарпатья. – К., 1984. 6. Кончаловский В.Ю. Цифровые измерительные устройства. – М., 1985. 7. Кутас Р.И. Геодинамические процессы и тепловой стан литосферы Карпатского региона // Исследования современной геодинамики Украинских Карпат / Под ред. В.И. Старостенко. – К., 2005. – С. 133-139. 8. Кутас Р.И. Поле тепловых потоков и геотермическая модель земной коры. – К., 1978. 9. Кутас Р.И., Гордиенко В.В. Тепловое поле Украины. – К., 1971. 10. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М., 1978. 11. Назаревич А.В. Методико-аппаратурные проблемы мониторинговых геофизических исследований та шляхи їх розв'язання (на прикладі геофізичного сейсмопрогностичного моніторингу в Закарпатті) // Вісник Київського університету. Геологія. – 2011. – № 55. – С. 57-60. 12. Назаревич А.В., Микита А.Ю. Метеотемпературні поля в масивах порід (як фактор впливу на результати деформографічних спостережень на РГС "Берегове" у Закарпатті) // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К., 2010. – С. 286-299. 13. Назаревич А.В., Назаревич Л.Є. Масштабно-енергетичні кореляційні співвідношення для вогнищ землетрусів Закарпаття: деякі наслідки та енергетична верифікація // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К., 2009. – С. 279-298. 14. Осадчий В.Г., Назаревич А.В., Назаревич Л.Є. Характеристики температурного режиму приповерхневих шарів гірських порід за даними досліджень на геофізичній станції "Лисовичі" (Передкарпаття) // Геодинаміка. – 2008. – № 1 (7). – С. 96-102. 15. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта. – М., 1965. 16. Чекалюк Э.Б., Федорцов И.М., Осадчий В.Г. Полевая геотермическая съемка. – К., 1974.

Надійшла до редколегії 04.06.12